

Dégradation des matériaux : Fatigue et fluage des matériaux

Références

Chapitre 7 (sections 7.3 et 7.5) p. 270-321

5-1

Introduction

- Que nous fournissent les essais vus jusqu'à présent?
- Quels sont les essais que nous avons vu jusqu'à présent?
- A quelles autres sollicitations mécaniques des matériaux peuvent être soumis?
- Quelles sont les variables qui ne furent pas prises en considération lors de l'essai de traction ou de dureté par exemple?
- Quelle serait, à votre avis, la réaction d'un matériau soumis à une charge statique pendant une durée plus longue que les minutes requises pour un essai de traction?
- Cette réaction dépend-elle de la température?
- La vitesse de déformation peut-elle modifier le comportement?
- Quelle est l'influence de l'environnement?
- Quelle est l'influence d'une variation cyclique?

5-2

Objectifs

- I. Fatigue des matériaux
 - Introduction
 - Notions de contraintes cycliques
 - Courbe de Wöhler (ou courbe SN)
 - Amorçage et propagation des fissures
 - Vitesse de fissuration
 - Facteurs influençant la durée de vie en fatigue
- II. Fluage des matériaux
 - Introduction
 - Tenue générale en fluage
 - Effets liés à la contrainte et à la température
 - Déterminer la vitesse de fluage et la durée de vie avant rupture à partir des courbes
 - Alliages utilisés à haute température

5-3

Objectifs

- I. Fatigue des matériaux
 - Introduction
 - Notions de contraintes cycliques
 - Courbe de Wöhler (ou courbe SN)
 - Amorçage et propagation des fissures
 - Vitesse de fissuration
 - Facteurs influençant la durée de vie en fatigue
- II. Fluage des matériaux
 - Introduction
 - Tenue générale en fluage
 - Effets liés à la contrainte et à la température
 - Déterminer la vitesse de fluage et la durée de vie avant rupture à partir des courbes
 - Alliages utilisés à haute température

5-4

Beaucoup de matériaux travaillent sous charges cycliques. Il faut donc comprendre l'influence d'une charge répétée sur le matériau!

5-5

Introduction

La fatigue ?

*La **fatigue** est une forme de défaillance qui se produit dans des structures (ponts, aéronefs, pièces de machines...) subissant des contraintes dynamiques et variables. Elle est susceptible de se manifester même lorsque la contrainte est nettement inférieure à la résistance à la traction ou à la limite conventionnelle d'élasticité dans le cas d'une charge statique. Une telle défaillance porte le nom de **fatigue** parce qu'elle succède habituellement à une longue période de cycles de déformation et de contrainte. (W.D. Callister, Jr. 2nd Ed)*

p.296 Des Matériaux

www.granddictionnaire.com

ASTM E1823-07a

« The process of progressive localized permanent structural change occurring in a material subjected to conditions which produce fluctuating stresses and strains at some points and which may culminate in cracks or complete fracture after a sufficient number of fluctuations » ASTM E1823-97

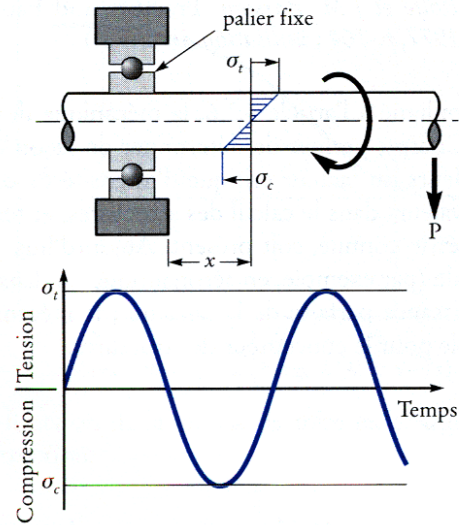
5-6

Flexion rotative

Flexion rotative

Flexion + rotation

Alternance de contraintes de tension et de compression



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

5-7

Objectifs

- I. Fatigue des matériaux
 - Introduction
 - **Notions de contraintes cycliques**
 - Courbe de Wöhler (ou courbe SN)
 - Amorçage et propagation des fissures
 - Vitesse de fissuration
 - Facteurs influençant la durée de vie en fatigue
- II. Fluage des matériaux
 - Introduction
 - Tenue générale en fluage
 - Effets liés à la contrainte et à la température
 - Déterminer la vitesse de fluage et la durée de vie avant rupture à partir des courbes
 - Alliages utilisés à haute température

5-8

Variables caractéristiques

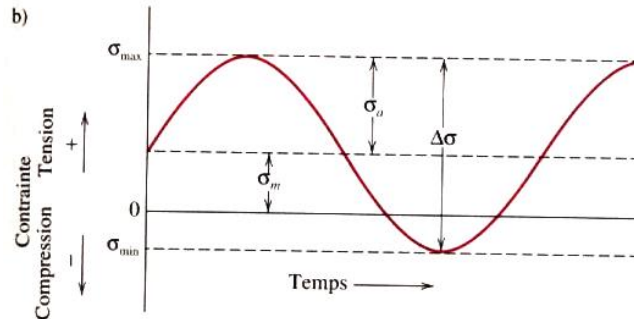
Contraintes min et max : σ_{max} et σ_{min}

Contrainte moyenne : $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

Variation de contrainte : $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

L'amplitude de contrainte : $\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$

Rapport de contraintes : $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$



Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

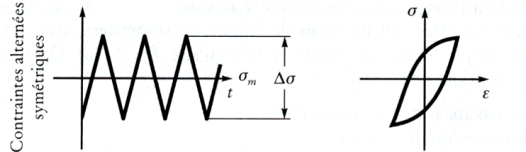
5-9

Types de sollicitation

Contraintes alternées
symétriques

$$\sigma_m = 0$$

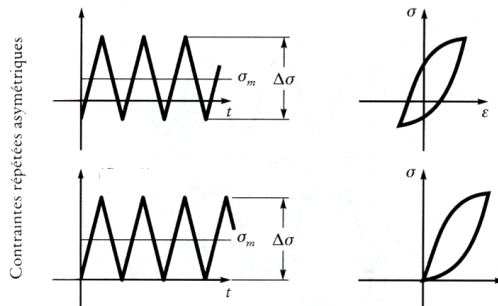
$$R = -1$$



Contraintes répétées
asymétriques

$$R \leq 0$$

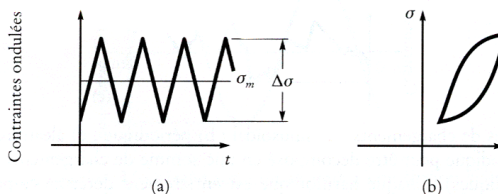
$$\sigma_m \leq \sigma_a$$



Contraintes ondulées

$$\sigma_m \geq \sigma_a$$

$$0 \leq R \leq 1$$



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

5-10

Types de sollicitations

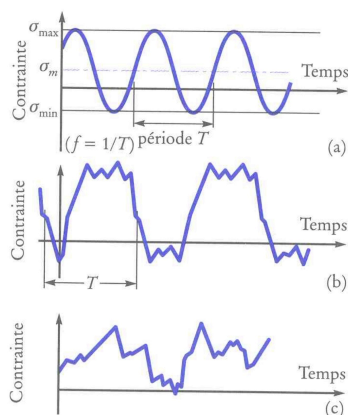
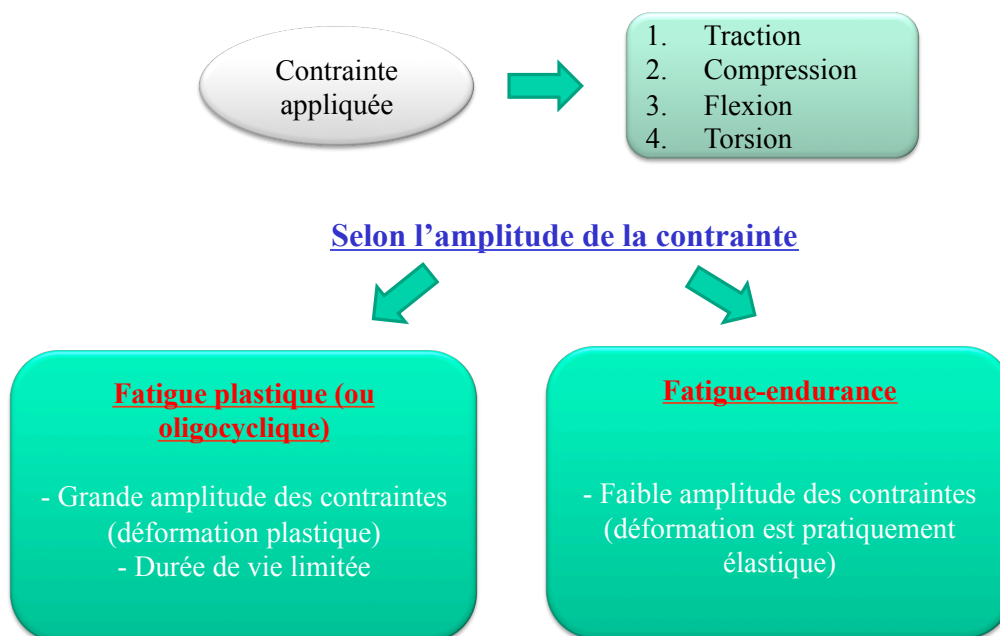


Figure 7.23 Types de chargements : a) sinusoïdal ; b) périodique ; c) aléatoire. Un chargement périodique peut être décomposé en une somme de chargements sinusoïdaux (harmoniques). Chaque harmonique est entièrement déterminée par sa variation de contrainte, $\Delta\sigma$, son rapport R , et sa fréquence, f . Un chargement aléatoire est déterminé par une fonction approchée (ou par une succession de blocs de chargements périodiques) la plus proche possible de la valeur aléatoire.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

5-11

Contraintes cycliques



5-12

Objectifs

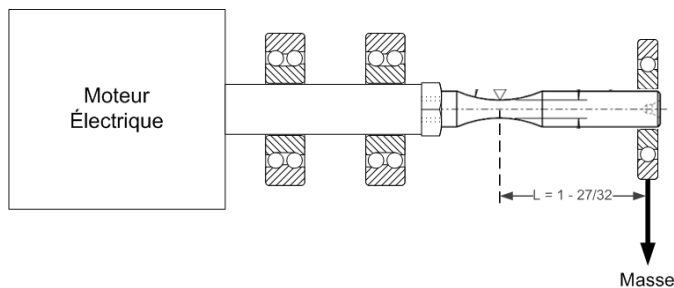
- I. Fatigue des matériaux
 - Introduction
 - Notions de contraintes cycliques
 - Courbe de Wöhler (ou courbe SN)
 - Amorçage et propagation des fissures
 - Vitesse de fissuration
 - Facteurs influençant la durée de vie en fatigue
- II. Fluage des matériaux
 - Introduction
 - Tenue générale en fluage
 - Effets liés à la contrainte et à la température
 - Déterminer la vitesse de fluage et la durée de vie avant rupture à partir des courbes
 - Alliages utilisés à haute température

5-13

Flexion rotative

Simulation en laboratoire

Reproduire le plus fidèlement possible l'état des contraintes en service.

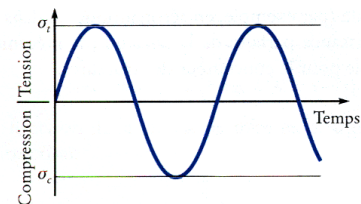


Mode opératoire

- Application d'une contrainte max $\approx 2/3 R_m$ du matériau et on compte le nombre de cycles précédant la rupture.
- Mêmes essais avec des contraintes de plus en plus faibles.

Flexion rotative

Flexion + rotation
Alternance de contraintes de tension et de compression.



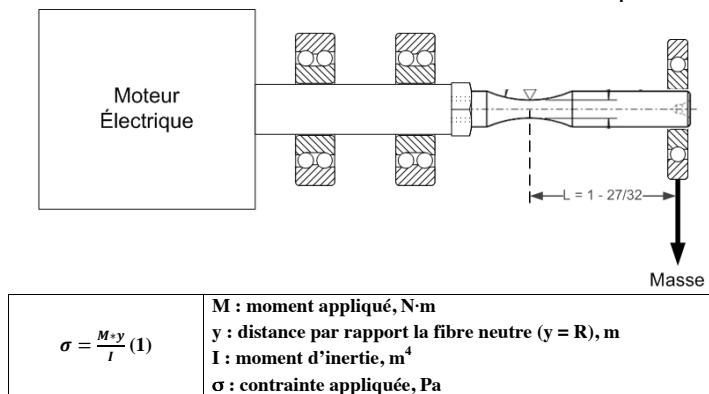
Flexion rotative

Simulation en laboratoire

Reproduire le plus fidèlement possible l'état des contraintes en service

Flexion rotative

Flexion + rotation
Alternance de contraintes de tension et de compression



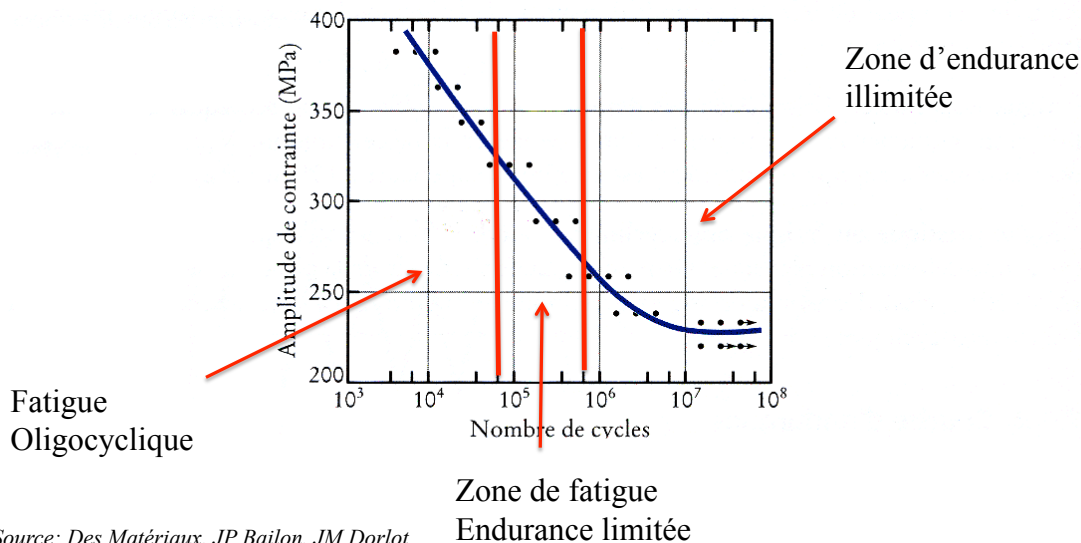
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

5-15

Courbe de Woller- Acier doux

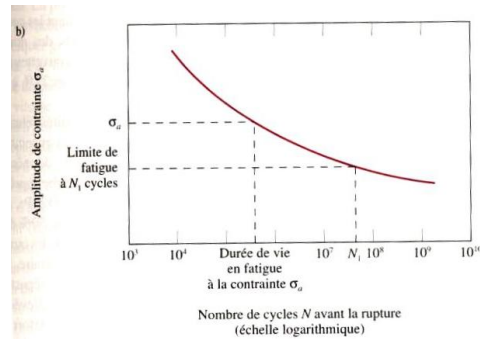
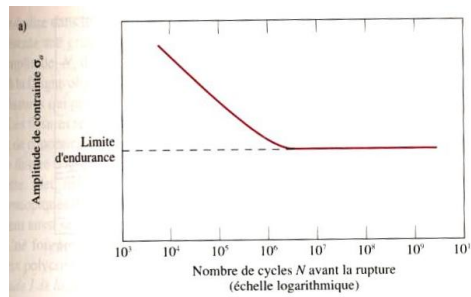
Courbes caractéristiques

On obtient des courbes contraintes en fonction du nombre de cycles
=> Courbes d'endurance (ou SN ou Wöhler)



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Courbe d'endurance



Données caractéristiques

- **Limite d'endurance** : limite en dessous de laquelle la rupture par fatigue ne se produit pas. (dépendant du matériau, absente chez les alliages non ferreux => Al, Cu...)
- **Limite de fatigue** : ampleur de la contrainte entraînant une rupture après un nombre X de cycles (ex : N_1 cycles)

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

5-17

Notions statistiques de la courbe d'endurance

Attention au côté **aléatoire** des essais de flexion rotative !!!

Origines :

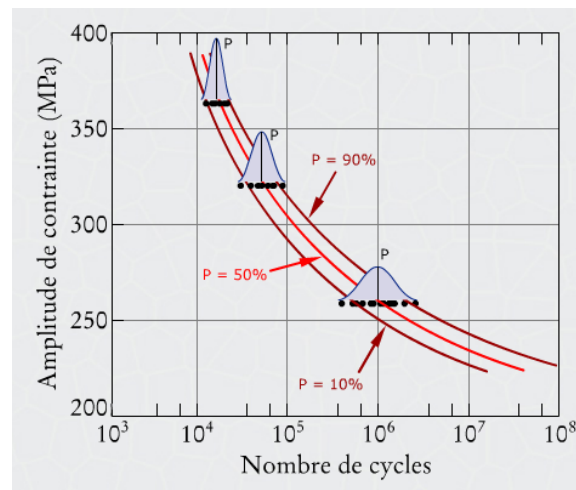
Ce problème est dû au grand nombre de paramètres internes et externes aux essais => difficilement maîtrisable

Solutions :

- Répétition des essais à chaque niveau de contrainte afin d'avoir une distribution statistique des résultats.
- Obtention d'une courbe d'endurance statistiquement significative => traçage des courbes équiprobabilités de rupture : 10 %, 50 % ou 90 % des échantillons se sont brisés.

Inconvénients :

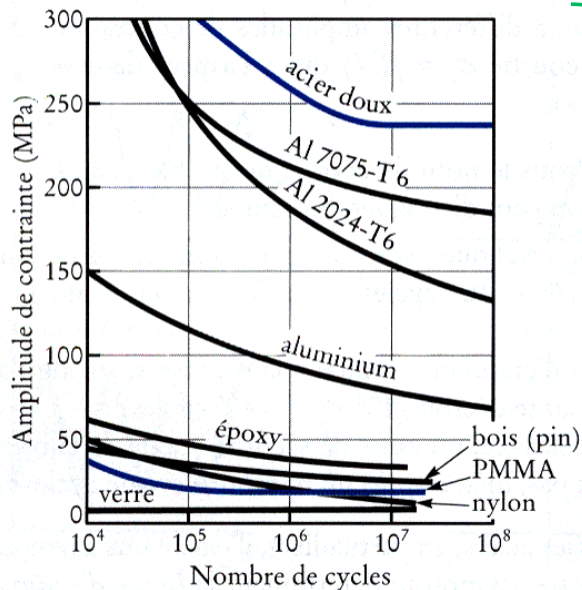
Cependant ce genre d'essai devient vite très dispendieux.



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

5-18

Courbes de Wöhler de différents matériaux



Remarques :

- Acier => possède un limite d'endurance (σ_D).
- Aluminium et ses alliages (7075-T6 ou 2024-T6) => pas de limite d'endurance.
- Polymère (nylon, PMMA, époxy), verre et bois => faible contraintes admises.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

5-19

Objectifs

- I Fatigue des matériaux
 - Introduction
 - Notions de contraintes cycliques
 - Courbe de Wöhler (ou courbe SN)
 - Amorçage et propagation des fissures
 - Vitesse de fissuration
 - Facteurs influençant la durée de vie en fatigue
- II Fluage des matériaux
 - Introduction
 - Tenue générale en fluage
 - Effets liés à la contrainte et à la température
 - Déterminer la vitesse de fluage et la durée de vie avant rupture à partir des courbes
 - Alliages utilisés à haute température

5-20

Rupture par fatigue

La rupture par fatigue se déroule en trois étapes :

1. **L'amorçage** : formation d'une petite fissure en un point de forte concentration de contrainte ($= N_a$ cycles)
2. **La propagation** : progression de la fissure avec le nombre de cycles de contrainte ($= N_p$ cycles)
3. **La rupture finale** : très rapide lorsque la fissure a atteint une taille critique (a_c)

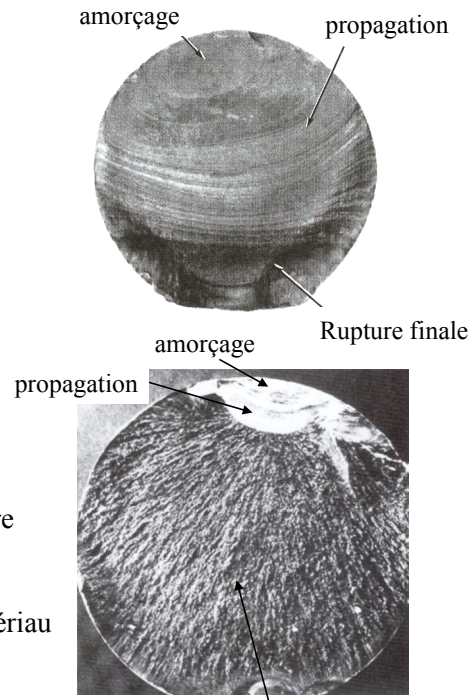
$$K = \alpha \sigma_{\max} \sqrt{\pi a_c} \geq K_C$$

Où K: Facteur d'intensité de contrainte associé à la fissure

σ_{\max} : valeur maximum de la contrainte de fatigue

a_c : longueur critique de la fissure

K_C : facteur critique d'intensité de contrainte du matériau



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

Rupture finale

5-21

Rupture par fatigue

La rupture par fatigue se déroule en trois étapes :

1. **L'amorçage** : formation d'une petite fissure en un point de forte concentration de contrainte ($= N_a$ cycles)
2. **La propagation** : progression de la fissure avec le nombre de cycles de contrainte ($= N_p$ cycles)
3. **La rupture finale** : très rapide lorsque la fissure a atteint une taille critique (a_c)

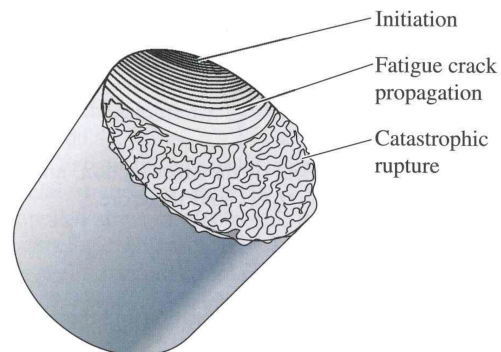
$$K = \alpha \sigma_{\max} \sqrt{\pi a_c} \geq K_C$$

Durée de vie en fatigue :

$$N_r = N_a + N_p$$

N_a et N_p dépendent :

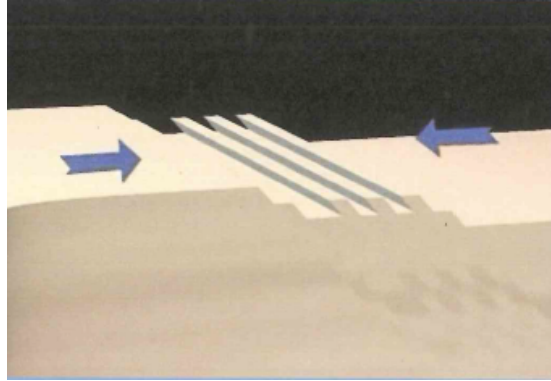
- Du matériau
- Du type d'essai (charge appliquée...)



Source: The Science and Engineering of Materials Donald Askerland

5-22

Que se passe-t-il à niveau microscopique?

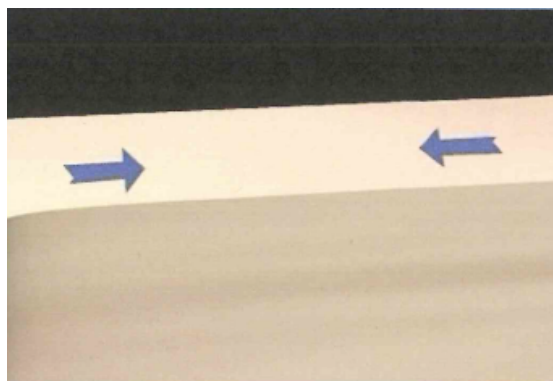


Formation de microfissures

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

5-23

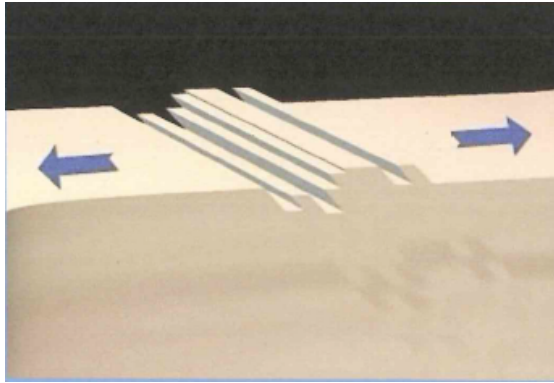
Que se passe-t-il à niveau microscopique?



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

5-24

Que se passe-t-il à niveau microscopique?

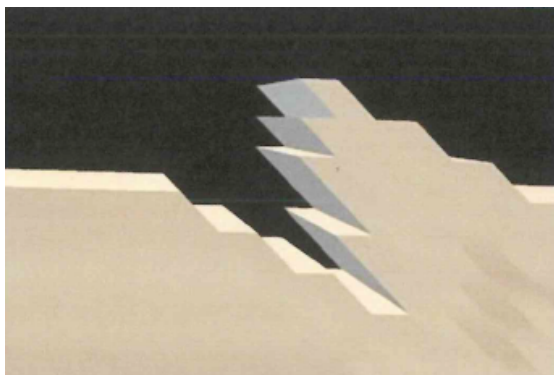


À chaque inversion du sens de contrainte, le glissement cristallographique n'est pas parfaitement symétrique

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

5-25

Que se passe-t-il à niveau microscopique?



Il y a formation progressive d'extrusions et d'intrusions

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

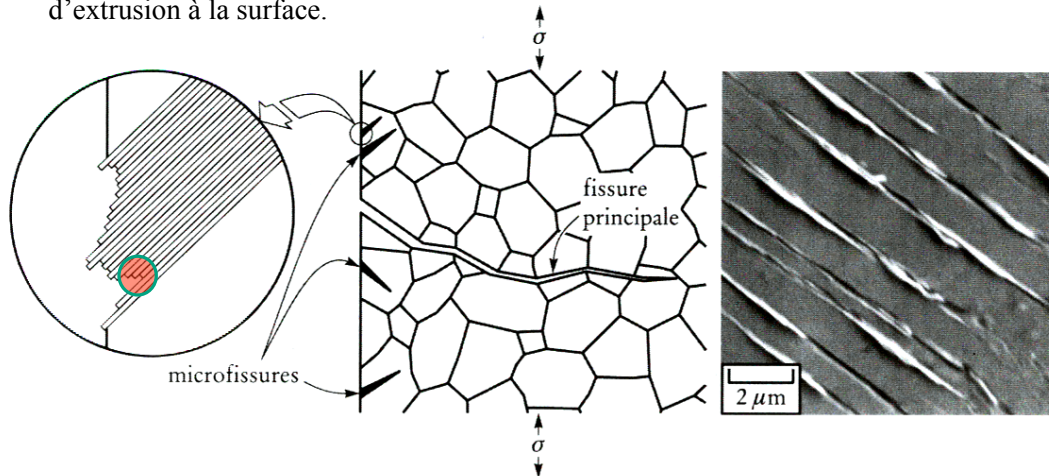
5-26

Rupture par fatigue dans les grains

Mouvement des dislocations non symétrique pendant les cycles de tension – compression => formation d'inclusions et d'extrusion à la surface.

Inclusions => concentrateurs de contrainte => propagation de fissures

Observation des inclusion et extrusion à l'aide d'un MEB



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

5-27

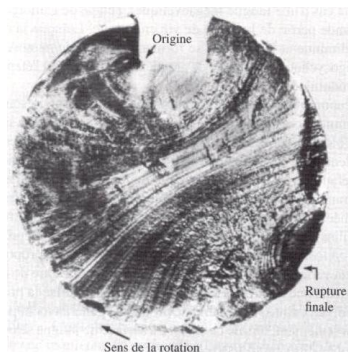
Faciès de rupture par fatigue

Type de chargement :

- Lorsque σ faible => amorçage difficile et donc $N_a > N_p$
- Lorsque σ forte => amorçage plus facile et donc $N_p > N_a$

Pendant la propagation :

- Apparition de **lignes d'arrêt** : visible à l'œil nu \Leftrightarrow interruption de la propagation (cycles de marche arrêt d'un appareil).
- Apparition de **stries de fatigue** : faible taille (=> MEB ou MET) \Leftrightarrow à la distance de progression de la fissure au cours d'un cycle.



lignes d'arrêt



stries de fatigue (MET)

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

5-28

Objectifs

- I. Fatigue des matériaux
 - Introduction
 - Notions de contraintes cycliques
 - Courbe de Wöhler (ou courbe SN)
 - Amorçage et propagation des fissures
 - **Vitesse de fissuration**
 - Facteurs influençant la durée de vie en fatigue
- II. Fluage des matériaux
 - Introduction
 - Tenue générale en fluage
 - Effets liés à la contrainte et à la température
 - Déterminer la vitesse de fluage et la durée de vie avant rupture à partir des courbes
 - Alliages utilisés à haute température

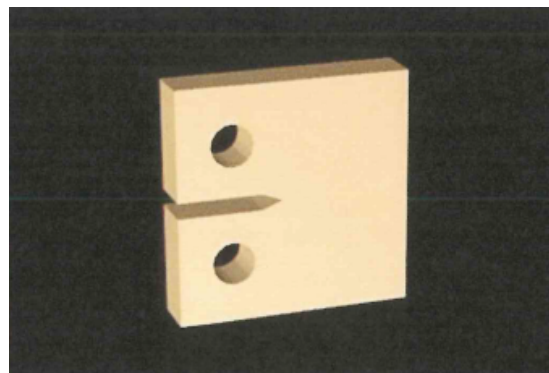
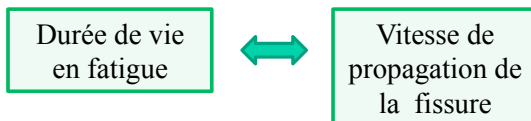
5-29

Vitesse de fissuration

Objectif :

Établir un critère permettant de prévoir la durée de vie en fatigue à partir :

- Paramètres liés au matériau
- L'état des contraintes

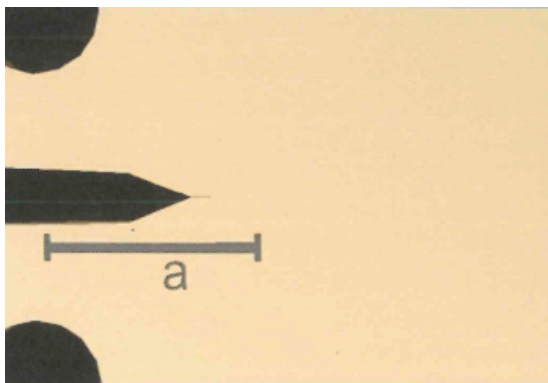
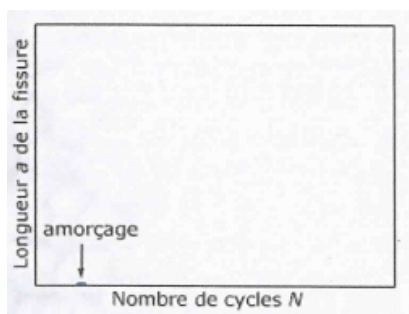
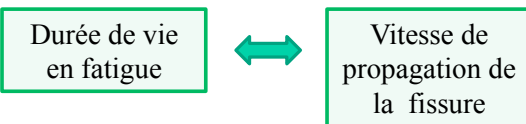


Vitesse de fissuration

Objectif :

Établir un critère permettant de prévoir la durée de vie en fatigue à partir :

- Paramètres liés au matériau
- L'état des contraintes



Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

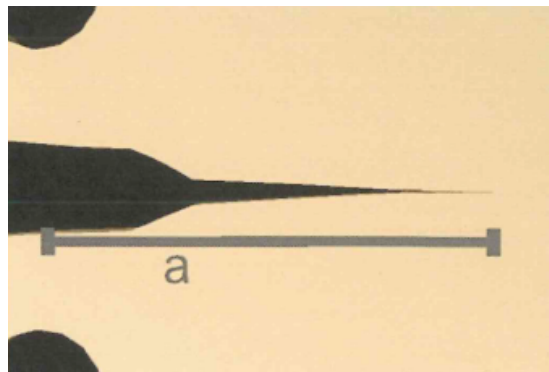
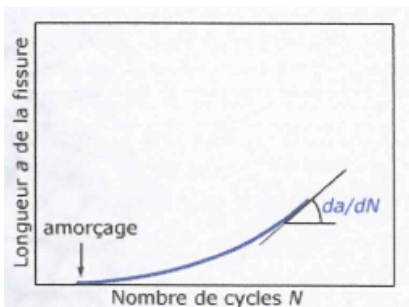
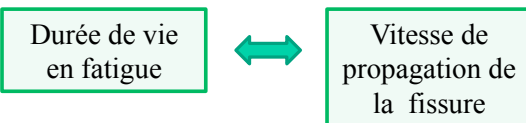
5-31

Vitesse de fissuration

Objectif :

Établir un critère permettant de prévoir la durée de vie en fatigue à partir :

- Paramètres liés au matériau
- L'état des contraintes



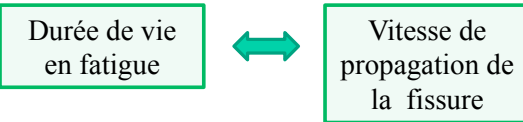
Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

5-32

Vitesse de fissuration

Objectif :

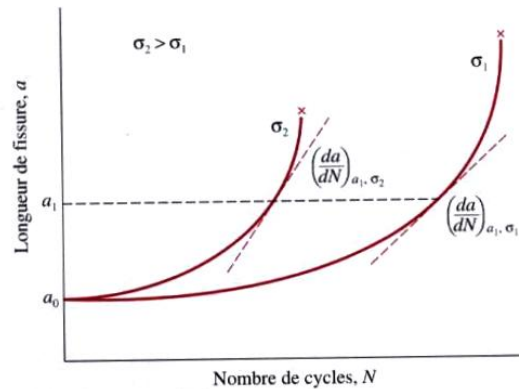
- Établir un critère permettant de prévoir la durée de vie en fatigue à partir :
 - Paramètres liés au matériau
 - L'état des contraintes



Vitesse de propagation de la fissure

$\frac{da}{dN}$ { a longueur de la fissure
 N nombre de cycles appliqués

$\frac{da}{dN}$ sans arrêt jusqu'à la rupture



Voir CD rom 7.54

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

5-33

Relation de Paris

Force motrice

Facteur d'intensité de contrainte

$$\Delta K = (K_{max} - K_{min})$$

$$\Delta K = \alpha (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \sqrt{\pi a}$$

Si σ_{min} compression on pose $\sigma_{min} = 0$

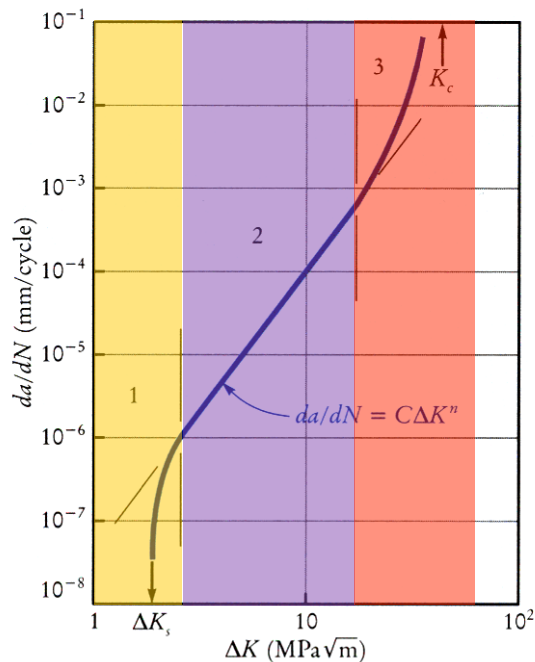
3 régimes :

- **Régime 1** : Quand ΔK faible alors (da/dN) tend vers 0 $\Rightarrow \Delta K_s$: le seuil de propagation.
- **Régime 2** : Quand la relation de Paris est respectée : régime de Paris.
- **Régime 3** : Accélération de (da/dN) quand ΔK se rapproche de la valeur critique K_c

Relation de Paris :

Relation entre la vitesse de fissuration et le facteur d'intensité de contrainte.

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n$$



5-34

Vitesse de fissuration

- Au cours du stade II, la propagation varie non seulement en fonction de l'amplitude de contraintes et de la taille de la fissure, mais en fonction des variables du matériaux.

Relation de Paris :

Relation entre la vitesse de fissuration et le facteur d'intensité de contrainte.

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n$$

$3 < n < 5$ pour les métaux

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

5-35

Relation de Paris

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n$$

$$\frac{da}{C \Delta K^n} = dN$$

$$N_r = \int_0^{N_r} dN = \int_{a_o}^{a_c} \frac{da}{C (\Delta K)^n}$$

$$N_r = \int_{a_o}^{a_c} \frac{da}{C (Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a})^m}$$

$$N_r = \frac{1}{C \pi^{m/2} (\Delta \sigma)^m} \int_{a_o}^{a_c} \frac{da}{Y^m a^{m/2}}$$

5-36

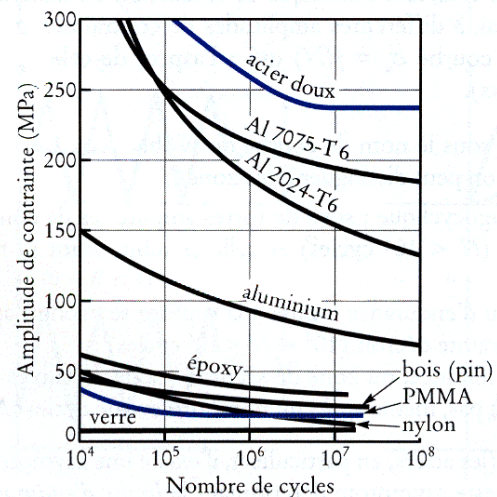
Exemples numériques

5-37

EXERCICE 7-10

Pour un axe devant subir en service des contraintes de flexion rotative, vous avez le choix entre deux alliages d'aluminium : le 2024-T6 et le 7075-T6. Les courbes de Wöhler de ces deux alliages sont données à la figure 7.26 du livre *Des Matériaux*. La durée de vie exigée pour l'axe est égale à 10^7 cycles.

- Quelle sera l'amplitude maximale de contrainte $\Delta\sigma$ tolérable sur l'axe selon l'alliage que vous choisirez ?
- Pour la durée de vie imposée à l'axe et pour une amplitude égale de la force de flexion imposée à l'axe, quelle devra être la valeur du rapport d_2/d_1 , où d_2 est le diamètre de l'axe s'il est fait d'alliage 7075-T6 et d_1 le diamètre de l'axe s'il est fait d'alliage 2024-T6 ?



5-38

EXERCICE 7-11

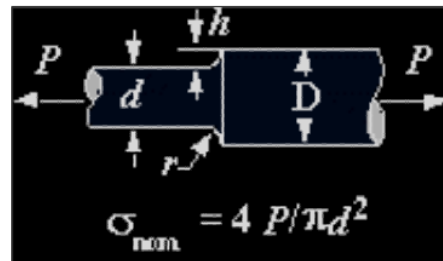
Fait de deux sections (de diamètre différent D et d) raccordées par un congé de rayon de courbure r , un axe en acier est soumis en service à un chargement cyclique en traction, d'amplitude constante et de contrainte moyenne nulle ($\sigma_{\text{moy}} = 0$). La force maximale F_{max} appliquée à l'axe est égale à **1,45 MN**. La courbe de Wöhler de l'acier est donnée ci-dessous.

Les dimensions de l'axe sont les suivantes : $D = 180 \text{ mm}$; $d = 100 \text{ mm}$; $r = 10 \text{ mm}$

- Quelle est la valeur du rapport $R = \sigma_{\text{min}} / \sigma_{\text{max}}$ caractérisant le chargement cyclique ?
- Si une fissure principale de fatigue apparaît dans le congé de raccordement de l'axe, quelle sera la durée de vie N de cet axe dans ces conditions de chargement ? *Conseil* : consultez l'abaque $K_{\text{tCongé}}$ à l'appendice I.

En observant la surface de rupture de l'axe rompu par fatigue, on constate que la fissure principale avait atteint une profondeur $a_c = 11 \text{ mm}$ à l'instant de la rupture finale. Le facteur géométrique α associé à cette fissure est égal à 1,27.

- Quelle la ténacité K_{IC} de l'acier ?



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

5-39

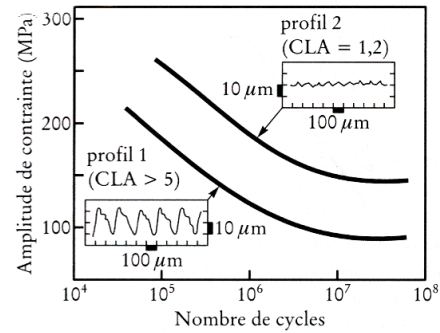
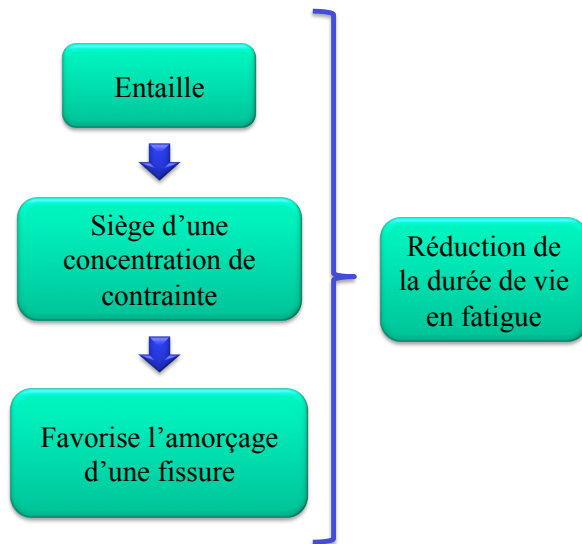
Objectifs

- I. Fatigue des matériaux
 - Introduction
 - Notions de contraintes cycliques
 - Courbe de Wöhler (ou courbe SN)
 - Amorçage et propagation des fissures
 - Vitesse de fissuration
 - Facteurs influençant la durée de vie en fatigue
- II. Fluage des matériaux
 - Introduction
 - Tenue générale en fluage
 - Effets liés à la contrainte et à la température
 - Déterminer la vitesse de fluage et la durée de vie avant rupture à partir des courbes
 - Alliages utilisés à haute température

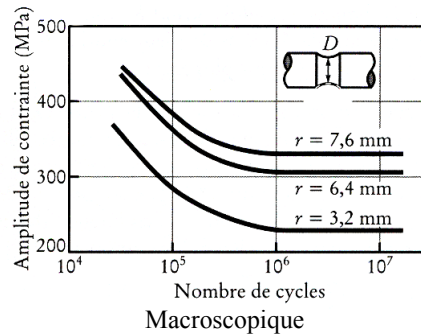
5-40

Effets de la surface

Le fini de surface



Microscopique (ex : usinage)



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

5-41

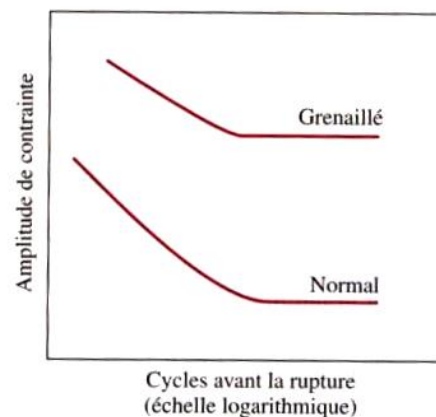
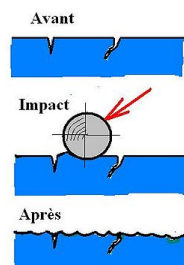
Effets de la surface

Traitements de surface

Imposer des contraintes de compression résiduelles à la surface => annulation d'une partie de la contrainte de tension.

- Traitements mécaniques

Ex. grenaillage : déformations plastiques ponctuelles => contraintes de compression résiduelles



Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister et <http://fr.wikipedia.org/wiki/Grenaillage>

5-42

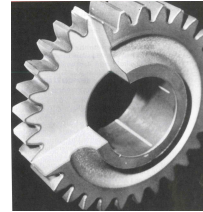
Effets de la surface

Traitements de surface

Imposer des contraintes de compression résiduelles à la surface => annulation d'une partie de la contrainte de tension.

- Traitements mécaniques

Ex. grenaillage : déformations plastiques ponctuelles => contraintes de compression résiduelles



- Traitements thermiques

La cémentation : enrichissement de la pièce en carbone ou azote sous atmosphère contrôlée à haute température.

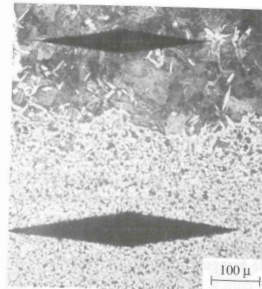


FIGURE 8.35 Micrographie montrant l'intérieur (en bas) et la couche de surface enrichie en carbone (en haut) d'un acier cémenté. L'indentation de microdureté plus faible atteste de la plus grande dureté de la couche de surface. Facteur d'agrandissement : 100.
Tiré de R.W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 3^e éd. © 1989, John Wiley & Sons, New York. Reproduction autorisée par John Wiley & Sons, Inc.

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

5-43

Effets de l'environnement

2 types de ruptures par fatigue favorisée par l'environnement :

- La fatigue thermique :

Variations de contraintes thermiques à haute température (même sans contrainte mécanique externe) : phénomène de dilatation thermique

$$\sigma = \alpha E \Delta T$$

α : coefficient de dilatation thermique

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

5-44

Effets de l'environnement

2 types de ruptures par fatigue
favorisée par l'environnement :

- La fatigue thermique :

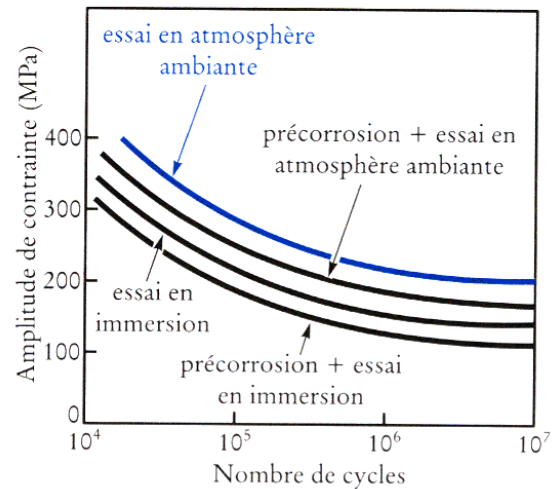
Variations de contraintes thermiques à haute température (même sans contrainte mécanique externe) : phénomène de dilatation thermique.

$$\sigma = \alpha E \Delta T$$

α : coefficient de dilatation thermique

- La fatigue corrosion :

Action simultanée d'une contrainte cyclique et d'une attaque chimique (milieu corrosif). Formation de piqûres de corrosion => points de concentration de contrainte.



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

5-45

Effets de l'environnement

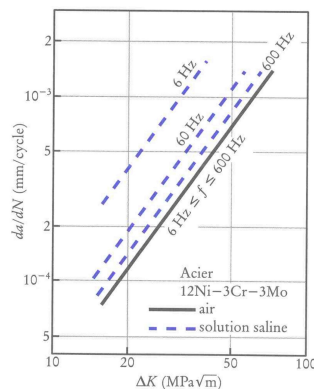
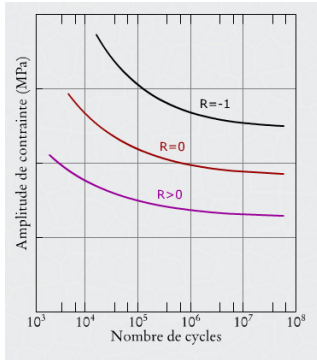


Figure 7.39 Influence de la fréquence de cyclage, f , sur la vitesse de fissuration, pour un acier (12 % Ni-3 % Cr-3 % Mo) soumis à la fatigue-corrosion dans une solution saline (3,5 % NaCl). (D'après S.T. Rolfe et J.M. Barsom, Fracture and Fatigue Control in Structures, Prentice Hall, 1977, p. 320 ; utilisation autorisée.)

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

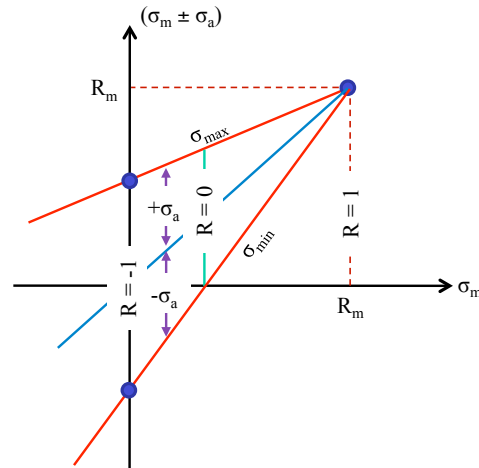
5-46

Effets de la contrainte moyenne



Facteur important : rapport des contraintes R
Plus R est positif et grand $\Rightarrow \sigma_m$ est grande.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$



Voir CD-Rom 7.5.5

5-47

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Méthode de Goodman

Données utiles :

- Résistance à la traction R_m
 - Limite d'endurance σ_D (ou limite de fatigue σ_F)
- données par un essai à $R = -1$.

Exercice

EXERCICE 7-15

Une pièce en acier est soumise à un chargement cyclique d'amplitude constante. Toutefois, vous ne disposez d'aucune donnée sur le comportement en fatigue-endurance de cet acier. Seule la résistance à la traction R_m de cet acier est connue ($R_m = 800$ MPa). Pour les deux cas suivants de chargement cyclique et en utilisant un facteur de sécurité égal à 2, calculez la contrainte maximale σ_{max} que vous tolérerez dans cette pièce pour éviter tout risque de rupture par fatigue :

- Contraintes alternées symétriques ($R = -1$).
- Contraintes répétées asymétriques ($R = 0$).

Conseil : consultez la section 7.5.5 du livre *Des Matériaux*.

Note pour cet acier : nous avons

$$\sigma_D = 0,37 R_m + 77 \text{ (en Mpa)}$$

σ_D : limite d'endurance pour $R = -1$
Relation vrai si $R_m > 2000$ MPa

Objectifs

- I. Fatigue des matériaux
 - Introduction
 - Notions de contraintes cycliques
 - Courbe de Wöhler (ou courbe SN)
 - Amorçage et propagation des fissures
 - Vitesse de fissuration
 - Facteurs influençant la durée de vie en fatigue
- II. Fluage des matériaux
 - **Introduction**
 - Tenue générale en fluage
 - Effets liés à la contrainte et à la température
 - Déterminer la vitesse de fluage et la durée de vie avant rupture à partir des courbes
 - Alliages utilisés à haute température

5-49

Introduction

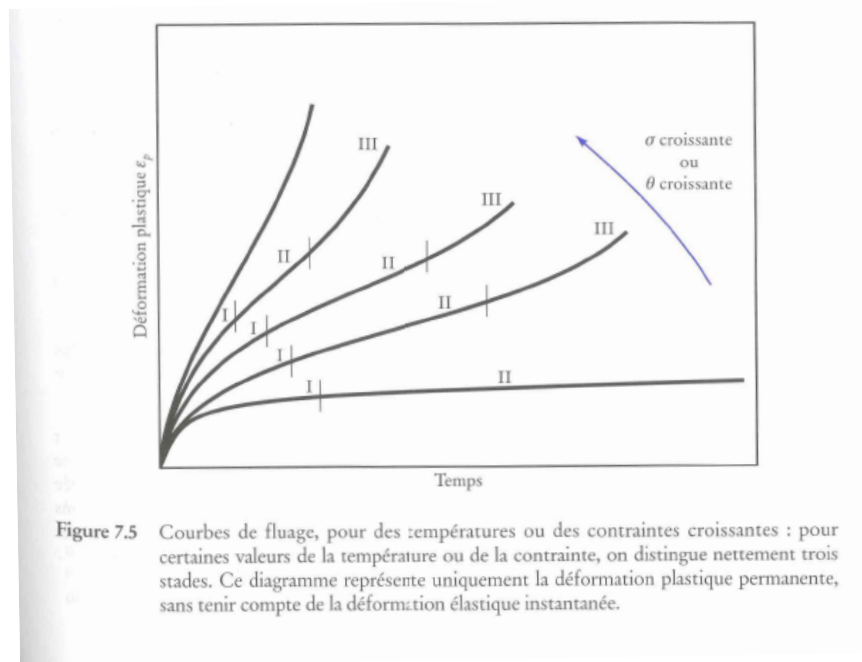
Le fluage?

Le **fluage** correspond aux déformations apparaissant dans un matériau exposé à des **températures élevées** et soumis à des **contraintes mécaniques statiques**

Observable dans tous les matériaux :

Plage de température :

- $T > 0.4T_f$ pour les polymères (très vulnérables)
- $T > 0.5T_f$ pour les métaux et alliages métalliques
- $T > 0.7 T_f$ pour les céramiques



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

5-51

Objectifs

- I. Fatigue des matériaux
 - Introduction
 - Notions de contraintes cycliques
 - Courbe de Wöhler (ou courbe SN)
 - Amorçage et propagation des fissures
 - Vitesse de fissuration
 - Facteurs influençant la durée de vie en fatigue
- II. Fluage des matériaux
 - Introduction
 - **Tenue générale en fluage**
 - Effets liés à la contrainte et à la température
 - Déterminer la vitesse de fluage et la durée de vie avant rupture à partir des courbes
 - Alliages utilisés à haute température

5-52

Essai de fluage

Principe :

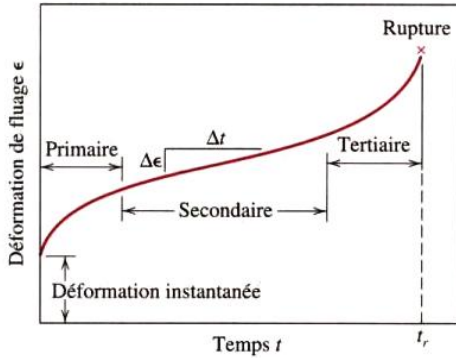
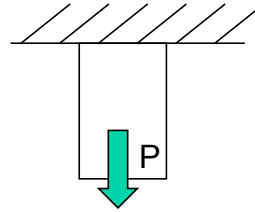
Application d'une charge à une température constante.

$$T = 0.6 \text{ à } 0.8 T_f$$

Réponse :

Déformation en fonction du temps

Vitesse de fluage : $\frac{d\varepsilon}{dt}$

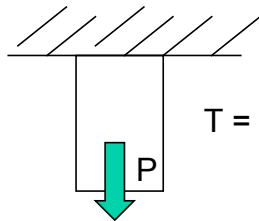


1. Application de la charge => déformation instantanée (élastique)
2. 3 régions distinctes :
 - Fluage primaire $\rightarrow \frac{d\varepsilon}{dt} \downarrow$
 - Fluage secondaire (stationnaire) $\rightarrow \frac{d\varepsilon}{dt} = cste$
 - Fluage tertiaire $\rightarrow \frac{d\varepsilon}{dt} \uparrow + rupture$

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

5-53

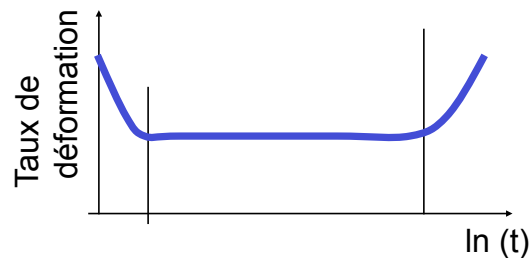
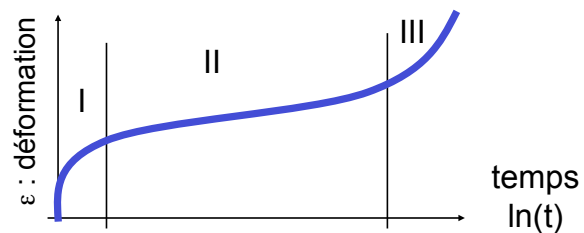
Fluage



$$T = 0.6 \text{ à } 0.8 T_f$$

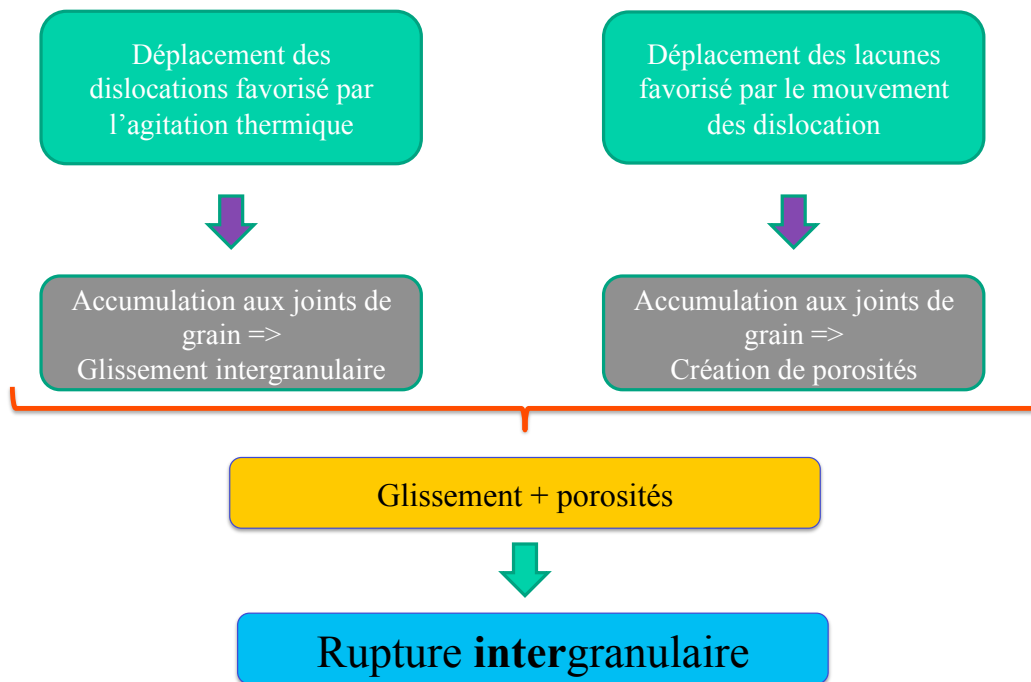
3 zones de déformation distinctes

- I : fluage primaire
- II : fluage secondaire
- III : fluage tertiaire



5-54

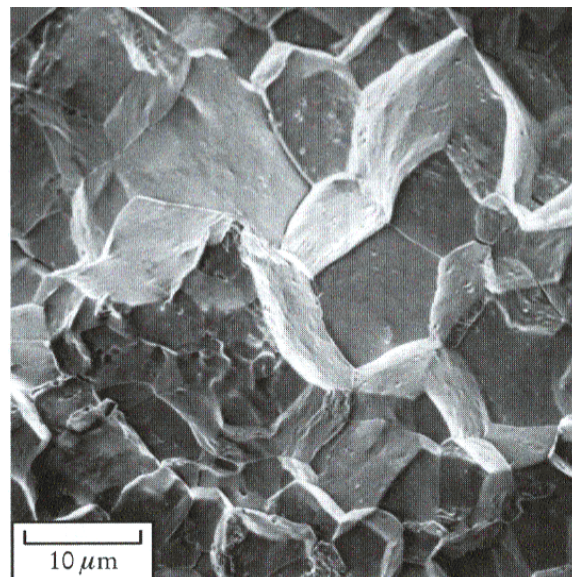
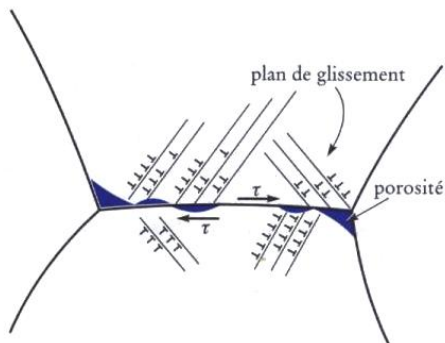
Mécanismes de déformation et rupture par fluage



5-55

Rupture par fluage

Rupture le long des joints de grains



- I Fatigue des matériaux
 - Introduction
 - Notions de contraintes cycliques
 - Courbe de Wöhler (ou courbe SN)
 - Amorçage et propagation des fissures
 - Vitesse de fissuration
 - Facteurs influençant la durée de vie en fatigue
- II Fluage des matériaux
 - Introduction
 - Tenue générale en fluage
 - Effets liés à la contrainte et à la température
 - Déterminer la vitesse de fluage et la durée de vie avant rupture à partir des courbes
 - Alliages utilisés à haute température

5-57

Effet de la contrainte et de la température

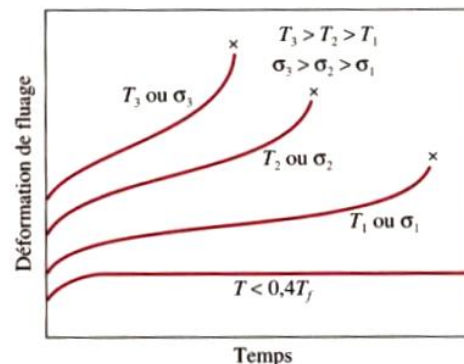
Influence de la contrainte

Mise en mouvement des dislocations. Lorsque les dislocations se multiplient et interagissent => limitation de leur déplacement : phénomène de consolidation

Influence de la température

Augmentation de la mobilité des dislocations (agitation thermique) : phénomène d'adoucissement

- $T < 0.4T_f$ => pas de variation de la déformation permanente.
- Lorsque T ou σ augmente :
 - Accroissement de la déformation instantanée
 - Hausse de la vitesse de fluage stationnaire (stade II)
 - Diminution de la durée de vie



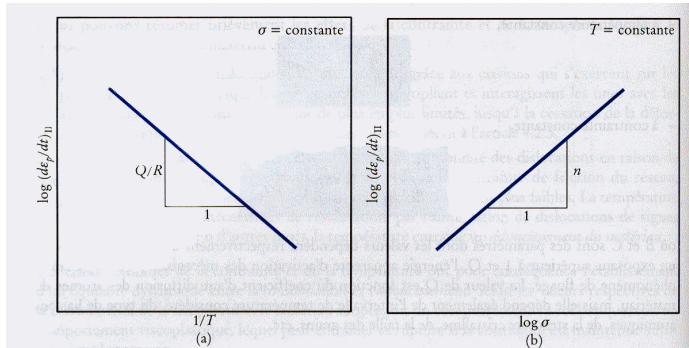
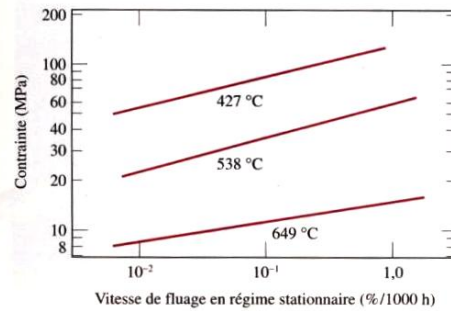
Variation de la vitesse de déformation :

À température constante À contrainte constante

$$\left(\frac{d\varepsilon_p}{dt}\right)_{II} = B\sigma^n \quad \left(\frac{d\varepsilon_p}{dt}\right)_{II} = C \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

B et C : constante (fonction de T et σ)

Q : énergie d'activation du fluage



Vitesse de fluage

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A \cdot \sigma^n \exp(-Q/RT)$$

n et Q = fonction du matériau

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

5-59

Fluage d'un acier inoxydable

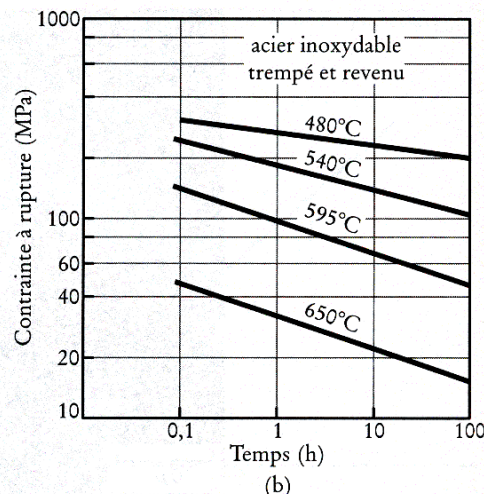
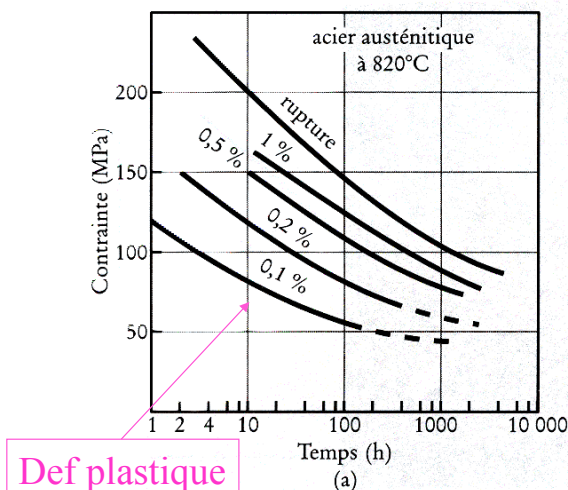


Figure 7.9 Représentation graphique du comportement d'un acier inoxydable austénitique soumis au fluage : a) diagramme isotherme, $\sigma = f(t)$, donnant le temps requis pour qu'une déformation plastique soit atteinte sous un certain niveau de contrainte ; b) diagramme de rupture donnant la durée de vie du matériau, $\sigma = f(t)$, soumis à une contrainte donnée, en fonction de la température d'essai et du temps de maintien de la contrainte.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

5-60

Objectifs

- I. Fatigue des matériaux
 - Introduction
 - Notions de contraintes cycliques
 - Courbe de Wöhler (ou courbe SN)
 - Amorçage et propagation des fissures
 - Vitesse de fissuration
 - Facteurs influençant la durée de vie en fatigue
- II. Fluage des matériaux
 - Introduction
 - Tenue générale en fluage
 - Effets liés à la contrainte et à la température
 - Déterminer la vitesse de fluage et la durée de vie avant rupture à partir des courbes
 - Alliages utilisés à haute température

5-61

Estimation - vie des pièces soumises au fluage Paramètre de Larson-Miller

Parfois : essai trop long
=> Il faut donc réussir à extrapoler les données

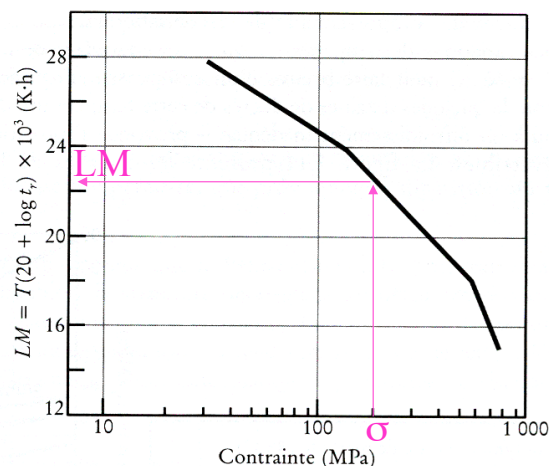
Principe :

- Effectuer des essais de fluage à une température supérieure avec la même contrainte.
- Extrapolation, en utilisant le paramètre de Larson-Miller :

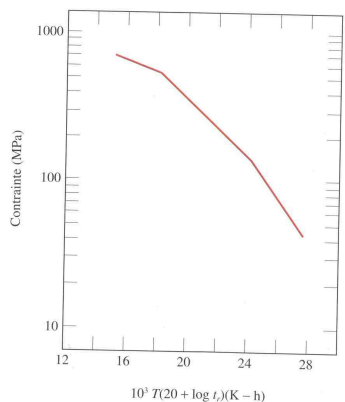
$$LM = T(a + \log t_r)$$

Sachant que :

- T : température (en K)
- a : constante (de l'ordre de 20)
- t_r : temps à la rupture (en h)



Exemple d'application :



A l'aide des données ci-contre, tentez de prédire la durée de vie avant rupture d'une pièce soumise à une contrainte de 140 MPa à 800°C (1073 K)

FIGURE 8.40 Courbe du logarithme de la contrainte en fonction du paramètre de Larson-Miller dans le cas d'un fer S-590.

Tiré de F.R. LARSON et J. MILLER, *Trans. ASME*, vol. 74, 1952, p. 765. Reproduction autorisée par l'American Society of Mechanical Engineers.

Source: *Science et Génie des Matériaux W.D. Callister*

5-63

Facteurs influençant la tenue en fluage

Paramètres liés au matériau :

- Température de fusion : T_f (T_f élevée = meilleure résistance au fluage)
- Module d'élasticité : E (E élevé = meilleure résistance au fluage)
- Taille des grains : d (d petit = vitesse de fluage élevée : glissement intergranulaire prononcé)

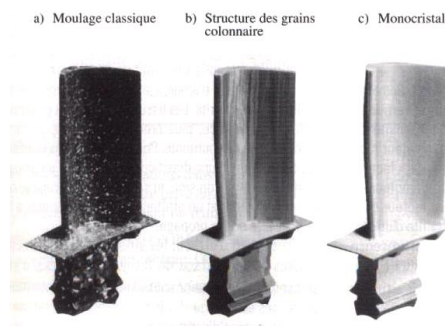
- I. Fatigue des matériaux
 - Introduction
 - Notions de contraintes cycliques
 - Courbe de Wöhler (ou courbe SN)
 - Amorçage et propagation des fissures
 - Vitesse de fissuration
 - Facteurs influençant la durée de vie en fatigue
- II. Fluage des matériaux
 - Introduction
 - Tenue générale en fluage
 - Effets liés à la contrainte et à la température
 - Déterminer la vitesse de fluage et la durée de vie avant rupture à partir des courbes
 - Alliages utilisés à haute température

5-65

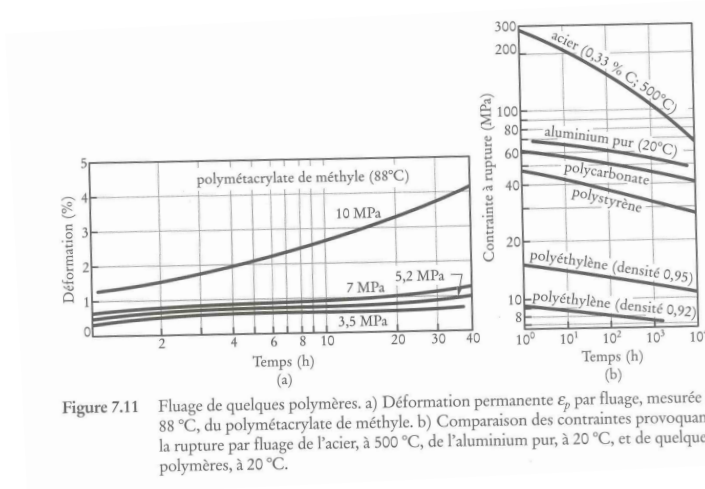
Matériaux utilisés à haute température

Matériaux résistants au fluage

- Aciers inoxydables
- Métaux réfractaires : T_f élevée
 - Niobium : Nb (2468°C) ; tungstène W (3410°C);
 - Molybdène : Mo et tantale : Ta
- Superalliages
 - à base de cobalt
 - à base de nickel
 - Autres éléments d'alliage : chrome, titane, métaux réfractaires (Nb, Mo, W, Ta)



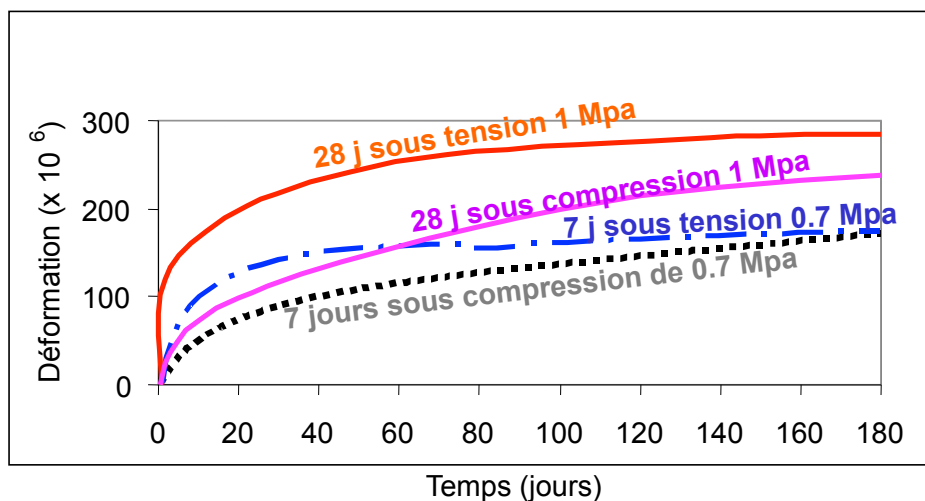
Fluage des polymères



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

5-67

Fluage du béton



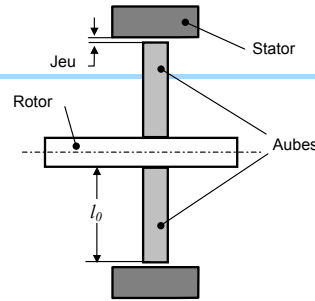
La vitesse de déformation ne cesse de décroître et tend vers zéro avec le temps. Il s'agit d'un tassement de matériau.

5-68

EXERCICE 7-4

Vous êtes responsable de la conception d'une turbine à gaz fonctionnant à 800 °C. Les aubes du rotor de cette turbine ont une longueur initiale $l_0 = 10$ cm et sont faites d'un superalliage de nickel, qui, à cette température, a un module d'Young égal à 180 GPa. En service et sous l'effet de la force centrifuge, les aubes sont soumises à une contrainte de 450 MPa. Le bureau d'étude a prévu un jeu initial de 3 mm entre le stator et l'extrémité des aubes (voir schéma ci-dessous).

Conscient que les aubes vont fluer en service, vous décidez de recommander une inspection préventive de la dimension des aubes après un certain temps t de fonctionnement de la turbine. Pour déterminer ce temps t , vous ne disposez que des quelques données suivantes concernant le fluage de ce superalliage lorsqu'il est soumis à une contrainte de 450 MPa.



Temps (h)	Déformation plastique ϵ_p de fluage (en %)		
	Température (°C)		
	700	800	900
1 000	0,100	0,500	0,900
11 000	0,200	?	22,036

NB : Toutes ces données sont relatives à des points expérimentaux situés dans le stade II des courbes de fluage du superalliage (fluage secondaire).

- Quelle est la valeur de la vitesse de fluage $d\epsilon/dt$ (en h^{-1}) pour le stade II de fluage de ce superalliage à 700 et à 900 °C ?
- Quelle est la valeur de l'énergie apparente d'activation Q (en kJ/mole) de la vitesse de fluage en stade II pour ce superalliage ?
- À quelle déformation élastique instantanée ϵ_{el} (en %) sont soumises les aubes quand la turbine est mise en service ?
- Après combien d'heures de service continu de la turbine à 800 °C (temps t exprimé en h) recommandez-vous de procéder à l'inspection dimensionnelle des aubes pour vérifier si le jeu entre le stator et l'extrémité des aubes est réduit à la moitié de sa valeur initiale ?
- Si la vitesse de rotation en service du moteur est plus élevée, le temps t requis pour l'inspection sera-t-il plus long ou plus court ? Justifiez votre réponse.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

5-69

*** À retenir ***

- Conditions opératoires menant aux dégradations mécaniques:
 - Fissure : fracture
 - Fatigue : Charges variables (répétées)
 - Fluage : charge constante à haute température ($> 0.4 T_f$ pour les métaux; $> 0.6 T_f$ pour les céramiques)
- La fatigue et le fluage comportent différents stades
- La fatigue
 - Intragranulaire
 - Equation de Paris
- Le fluage
 - Intergranulaire
 - Equation Larson-Miller

5-70

Récapitulatif

